



Envejecimiento y mejora

Ageing and upgrading

Revista de Obras Públicas
nº 3.536. Año 159
Octubre 2012
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Francisco J. Sánchez Caro. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Vocal del Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Geotecnia de Proyectos y Obras (GEOprob). Madrid (España). fsc@geoprob.com

Irene Domingo Comeche. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Jefe de Servicio. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza (España). idomingo@chebro.es

Manuel G. de Membrillera Ortuño. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Vocal Colaborador del Comité Español de Grandes Presas. Miembro de AUSIGETI

Director de Operaciones. OFITECO. Madrid (España). megomezdemembrillera@ofiteco.com

Resumen: En este artículo se sintetiza y comenta las principales contribuciones orales y escritas presentadas en la cuestión "Q95. Envejecimiento y mejora", desarrollada durante el pasado XXIV Congreso Internacional de Grandes Presas celebrado en Kyoto.

Palabras Clave: Presas; Envejecimiento; Mejora; Riesgos; Comportamiento a largo plazo; Puesta fuera de servicio; Seguridad sísmica; Hormigón y mampostería; Materiales sueltos y Presas de escollera con pantalla de hormigón

Abstract: This paper summarizes and comments on the main oral and written contributions submitted to "Question 95. Ageing and upgrading", which took place during the XXIV International Congress on Large Dams, held in Kyoto.

Keywords: Dams; Ageing; Upgrading; Risks; Long-term Behavior; Decommissioning; Seismic Safety; Concrete and Masonry; Embankment and CFRD

1. Introducción

La cuestión Q95, dedicada al envejecimiento y mejora de presas y embalses, ha sido uno de los cuatro temas que fueron seleccionados para abordarse en el XXIV Congreso Internacional de Grandes Presas, celebrado durante el mes de junio de 2012 en Kyoto.

Teniendo en cuenta que la edad media del inventario mundial de presas aumenta de forma irremediable, y que muchas infraestructuras han superado la centena de años en explotación, el ICOLD ha tratado de propiciar el avance tecnológico en esta cuestión.

De hecho, prolongar la vida útil de las presas, optimizar económicamente su operación y mantenimiento, conocer las condiciones de seguridad en que se encuentran las presas, así como mantenerlas en niveles adecuados de seguridad y servicio constituyen aspectos fundamentales de la explotación de presas.

El envejecimiento y la mejora de seguridad de las presas frente al paso del tiempo han sido analiza-

dos con profusión desde diferentes perspectivas, al tiempo que se encuentran ligados con la seguridad de presas, en sí misma, además de la propia explotación. A lo largo de la historia de los congresos del ICOLD, puede encontrarse, directa o indirectamente, como tema analizado en las siguientes cuestiones:

- Q1a: Deterioro por envejecimiento del hormigón en presas de gravedad (año 1933, Congreso de Estocolmo)
- Q20: Recrecimiento de presas existentes, incluyendo la construcción de nuevas presas por fases (año 1958, Congreso de Nueva York)
- Q29: Resultados e interpretación de medidas realizadas en grandes presas, incluyendo observaciones sísmicas (año 1969, Congreso de Edimburgo)
- Q32: La seguridad de las presas desde el punto de vista de la cimentación y la seguridad de las laderas del vaso (año 1967, Congreso de Estambul)

- Q34: El comportamiento y deterioro de las presas (año 1967, Congreso de Estambul)
- Q38: Supervisión de presas y embalses en explotación (año 1970, Congreso de Montreal)
- Q49: Deterioro o rotura de presas (año 1979, Congreso de Nueva Delhi)
- Q52: Seguridad de presas en explotación (año 1982, Congreso de Río de Janeiro)
- Q59: Rehabilitación de presas para asegurar su seguridad (año 1985, Congreso de Lausana)
- Q65: Envejecimiento de presas y medidas paliativas (año 1991, Congreso de Viena)
- Q68: Evaluación de la seguridad y mejora de presas existentes (año 1994, Congreso de Durban)
- Q70: Construcción por fases, recrecimiento o modificación de presas (año 1994, Congreso de Durban)
- Q75: Incidentes y roturas de presas (año 1997, Congreso de Florencia)
- Q76: El uso del análisis de riesgos para apoyar decisiones en materia de seguridad (año 2000, Congreso de Beijing)
- Q78: Auscultación de presas y sus cimientos (año 2000, Congreso de Beijing)
- Q82: Envejecimiento y rehabilitación de presas de hormigón y mampostería, incluyendo obras auxiliares (año 2003, Congreso de Montreal)
- Q90: Mejora de presas existentes (año 2009, Congreso de Brasilia)

En este Congreso de Kyoto se ha presentado un total de 41 artículos o respuestas a esta cuestión 95, relacionándose experiencias de 18 países distintos. Estos artículos dan una idea general del estado del arte en la cuestión.

2. Estructura de la cuestión

Esta cuestión se desarrolló íntegramente el día 8 de junio, en el salón principal del Palacio de Convenciones de Kyoto, y tuvo como ponente general interino al propio moderador de la sesión, el Sr. Robin Charlwood, de origen británico pero que representa a Estados Unidos en el ICOLD y es responsable del Comité Técnico en presas de hormigón. En principio, para esta cuestión Q95 se pidió respuestas a los siguientes temas:

- Q.95.1: Riesgos asociados con el comportamiento a largo plazo de los cimientos

- Q.95.2: Comportamiento a largo plazo de las presas y sus materiales
- Q.95.3: ¿Mejora o puesta fuera de servicio?
- Q.95.4: Mejora de la seguridad sísmica

Sin embargo, el moderador de la cuestión estimó que los artículos recibidos no se ajustaban adecuadamente a los temas iniciales y, por tanto, redistribuyó los temas y las respuestas con el objetivo de facilitar la exposición y análisis durante la sesión. Los temas que finalmente se trataron son los siguientes:

- Q.95.1: Riesgos asociados con el comportamiento a largo plazo de los cimientos
- Q.95.2: Comportamiento a largo plazo en materiales y presas de hormigón y mampostería
- Q.95.3: Comportamiento a largo plazo en materiales y presas de materiales sueltos y escollera con pantalla de hormigón
- Q.95.4: Mejora de la seguridad estática, hidrológica y sísmica, incluyendo la posible puesta fuera de servicio

Por su parte, en la Tabla 1 se muestra las diferentes respuestas ordenadas por país y tema.

Tabla 1.		
País	Número de artículos	Nº Q
Canadá	3	4,5,6
E.E.U.U.	1	30
Eslovaquia	1	2
Eslovenia	1	13
ESPAÑA	5	23,24,25,26,27
Francia	8	11, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 29
Irán	1	3
Islandia	2	14, 16
Italia	1	31
Japón	5	36, 37, 38, 39, 40
Noruega	1	35
Polonia	1	7
Rep. Checa	1	1
Rumanía	1	10
Rusia	1	8
Sudáfrica	3	32, 33, 34
Suecia	4	9, 12, 18, 28
Suiza	1	41
TOTAL: 18	41	





Fig. 1. Vista de la presa de Bilciuresti desde aguas abajo, tras el accidente sufrido. Analizado por Stematiu et al. en la R10.

3. Ponencia del relator general

En su informe, el relator general de la cuestión lleva a cabo un repaso general de todas las respuestas recibidas. Se presenta a continuación una síntesis de las mismas, dejando aparte las comunicaciones españolas, que serán resumidas en un apartado específico.

3.1. Riesgos asociados con el comportamiento a largo plazo de los cimientos

En relación con este subtema, se han recibido 9 artículos que tratan un interesante abanico de cuestiones geotécnicas en el comportamiento de los cimientos a largo plazo; constituyen aspectos que pueden ser tenidos en cuenta en la gestión de seguridad de presas en fase de explotación.

Richtr et al. (R1), de la República Checa, consideran el problema de sellar el cimiento en presas checas de mampostería, relacionado con filtraciones a través del mismo, mostrando algunos ejemplos de presas con más de 100 años en explotación.

Por su parte, Bednárová (R2) de Eslovaquia, presenta el análisis del comportamiento de la presa de Vlcia Dolina, de gravedad, considerando las condiciones de su pantalla de impermeabilización en el cimiento, las filtraciones y el sistema de auscultación.

Morency y Carrier (R4), de Canadá, presentan las principales conclusiones derivadas del comportamiento de las pantallas continuas de impermeabilización utilizadas en el cimiento de las estructuras

de tierra existentes en el proyecto Peribonka (Québec), tras 5 años de explotación.

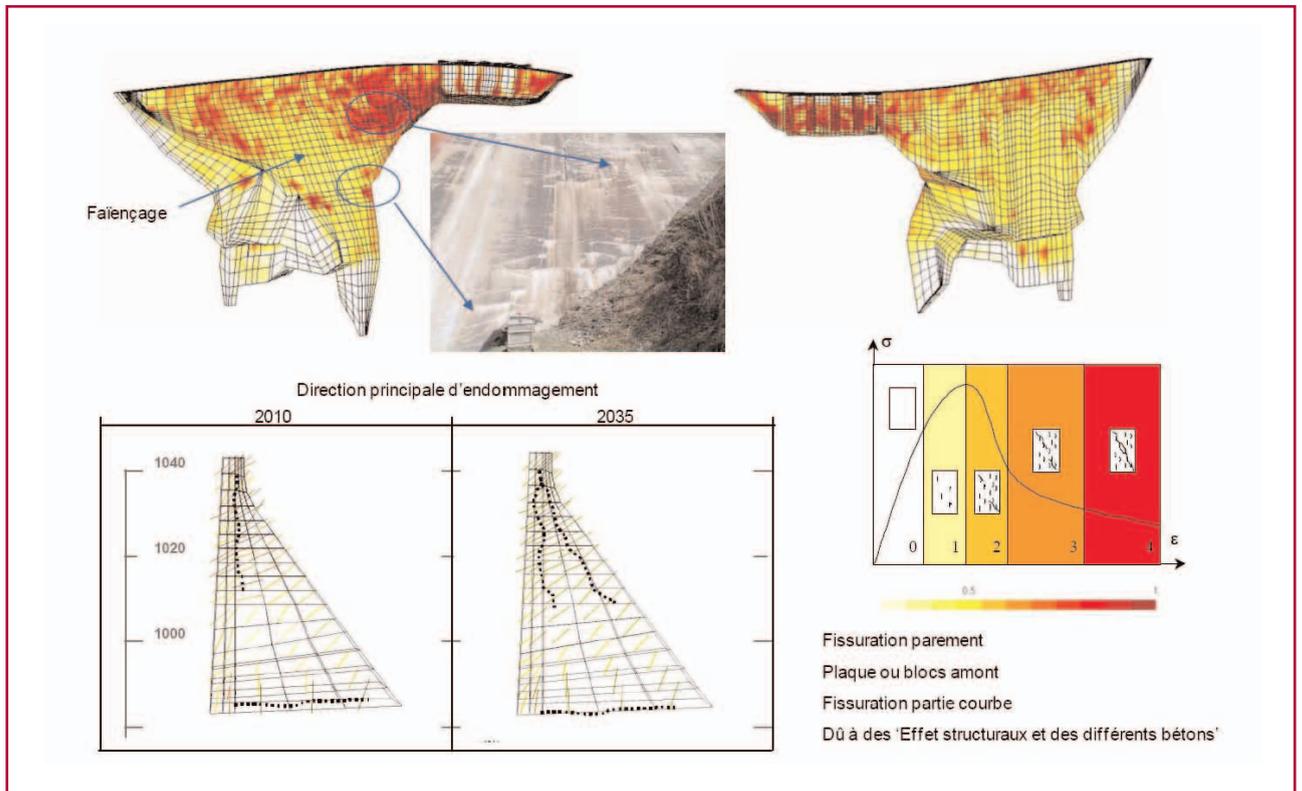
En la respuesta R9, Hassanzadeh et al., de Suecia, analizan las deformaciones y familias de fisuras producidas en el cimiento de las estructuras que albergan los generadores hidroeléctricos en un complejo que incluye, además de la casa de máquinas, una presa de contrafuertes. Muestran la utilización de modelos no lineales de elementos finitos para determinar las causas de las fisuras aparecidas, incidiendo en los efectos térmicos y los derivados de las condiciones de humedad.

Stematiu et al. (R10), de Rumanía, presentan en su artículo los efectos que el envejecimiento de las infraestructuras tienen sobre el cimiento de varias presas rumanas, considerando la integridad del macizo rocoso, los fenómenos de disolución, la influencia del estado de los cuencos de amortiguación sobre el cimiento de la presa y las consecuencias de disminuir la cota del lecho del río aguas abajo.

Bourdarot y Hoonakker (R11), de Francia, analizan el comportamiento de dos presas bóveda cimentadas en valles anchos. Consideran la información proporcionada por los piezómetros y el sistema de drenaje de las presas a fin de obtener la distribución de presiones intersticiales en la interfaz presa-cimiento para distintos escenarios de sollicitación.

Finalmente, Fabre et al. (R21), también desde Francia, abordan a la luz de la nueva reglamentación francesa diversos ejemplos de problemas en cimientos derivados del envejecimiento de las infraestructuras.

Fig. 2. Comparación entre los daños estimados mediante un modelo determinista y el patrón de fisuración observado en la presa de Chambon. Analizado por Chulliat et al. en la R15.



3.2. Comportamiento a largo plazo en materiales y presas de hormigón y mampostería

En este subtema de la cuestión Q.95 se trataron cuestiones relacionadas con la gestión de seguridad en presas de hormigón y mampostería a largo plazo. En concreto, entre los 12 artículos recibidos se prestó especial atención a los casos de expansividad en hormigones.

En primer lugar, Saint-Pierre y Philliber (R5), desde Canadá, presentan un control de calidad de hormigones basado en la utilización de la velocidad de ultrasonidos a través del hormigón, que se compara con la velocidad medida sobre una muestra intacta. Determinan así un índice CQD ("Concrete Quality Designation") similar al empleado para caracterizar macizos rocosos.

Rivard et al. (R6), también canadienses, muestran su ingente experiencia en la evaluación y análisis de estructuras hidráulicas afectadas por reacciones álcali-árido.

Sudakov et al. (R8), desde Rusia analizan el comportamiento de presas de hormigón situadas en áreas con clima extremo, teniendo en consideración las recomendaciones técnicas existentes junto con soluciones constructivas aplicadas. En concreto, mues-

tran el caso del aliviadero de la presa de Sayano-Shushenskaya.

Desde Suecia, Ekström y Persson (R12), muestran los problemas de estabilidad y envejecimiento que sufre una presa de gravedad construida en 1920. Analizan con detalle una estructura lateral que precede a la cámara de carga de la central aladaña.

Zvanut (R13), de Eslovenia, también se centra en el comportamiento a largo plazo de una serie de presas de gravedad, incidiendo especialmente en los sistemas de auscultación de las mismas y las nuevas automatizaciones incorporadas.

La respuesta R15, elaborada por Chulliat et al. desde Francia, presenta los últimos avances existentes en el estudio de patologías de expansividad en presas, centrándose en el caso de la presa de Chambon.

Igualmente desde Francia, Noret et al. muestran en la respuesta R19 las diferentes investigaciones de campo y los modelos numéricos elaborados con el objetivo de predecir y explicar el patrón de fisuras existente en la presa bóveda de Bimont, que tras 60 años de explotación sufre fenómenos expansivos en su hormigón.

Degoutte et al., también desde Francia, analizan en la respuesta R29 los problemas de envejecimiento

que sufren varias presas de mampostería construidas hace más de un siglo, incluyendo problemas de subpresiones, inestabilidad en escenarios de avenida, disolución de materiales. En concreto, se muestra los ejemplos de las presas de Cennes-Monestiés, Mesce y Dardennes.

En la respuesta R31, Berra et al., desde Italia, presentan sus recientes investigaciones en fenómenos de expansividad en hormigones debido a reacciones álcali-árido. Han llevado a cabo ensayos de laboratorio donde estudian la cantidad de álcali liberado por el hormigón en diferentes condiciones de temperatura, inmerso en una solución acuosa de hidróxido cálcico o hidróxido potásico. Con todo ello, valoran para tres tipos de áridos la contribución potencial que tiene su álcali para el contenido total de álcali en el hormigón y, por tanto, las implicaciones que ello tiene a largo plazo en las patologías expansivas.

Por último, los surafricanos Hattingh y Oosthuizen evalúan en la respuesta R33 el comportamiento patológico de la presa bóveda de Kouga, concluida en el año 1969, y que sufre fenómenos de expansividad debido a las areniscas cuarcíticas utilizadas como áridos y un cemento con alto contenido de álcalis.

3.3. Comportamiento a largo plazo en materiales y presas de materiales sueltos y escollera con pantalla de hormigón

En este subtema de la cuestión Q.95 se considera el comportamiento a largo plazo de los materiales y las presas de materiales sueltos en 6 artículos, junto con 2 respuestas adicionales sobre presas de escollera con pantalla de hormigón.

Los polacos Radzicki y Bonelli, en la respuesta R7 presentan su experiencia en la auscultación de filtraciones en presas de materiales sueltos mediante el control indirecto de temperaturas a través de fibra óptica, utilizando el modelo IRFTA ("Impulse Response Function Thermal Analysis").

Desde Francia, Beck et al. comparten en la respuesta R17 su experiencia en la rehabilitación del canal de Curbans mediante el uso de materiales bituminosos, junto con sus recomendaciones de mantenimiento preventivo.

En la respuesta R18, los suecos Johansson et al. exponen la mejora del sistema de auscultación lle-

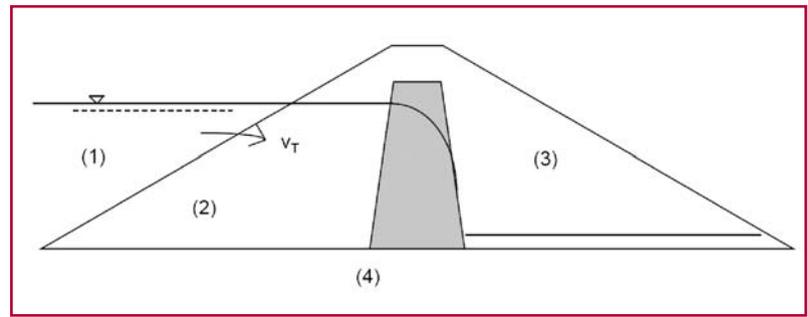


Fig. 3. Principales procesos térmicos que se producen en una presa de materiales sueltos. Analizado por Sjödaahl et al. en la R28. (1) Variación estacional de temperatura; (2) Transporte por advección y conducción; (3) Intercambio de calor con la atmósfera; (4) Flujo geotérmico en el cimiento.

vado a cabo en la presa de Seitevare, que tras 30 años de explotación ha sufrido varias rehabilitaciones de importancia.

Fabre et al., desde Francia, presentan en la respuesta R22 sus avances en la identificación y cuantificación del envejecimiento en diques y presas de materiales sueltos, utilizando información proveniente de 39 estructuras. Repasan una serie de potenciales patologías en el cuerpo de presa y los cimientos, según el tipo de estructura, y aportan criterios objetivos de evaluación basados en la evolución de asentamientos, las presiones intersticiales en el cuerpo de presas y el nivel de filtraciones.

En la respuesta R28, Sjödaahl et al. muestran su experiencia en dos presas suecas de materiales sueltos, equipadas con un sistema distribuido de auscultación de filtraciones basado en la medición indirecta de temperaturas mediante fibra óptica.

Desde Suráfrica, Badenhorst et al. analizan en la respuesta R32 el caso de la presa de Rietvlei, de 32 m de altura sobre cimientos, donde han empleado un novedoso sistema de refuerzo en la torre de toma.

Finalmente, desde Islandia, Johannesson et al. analizan en las respuestas R14 y R16 cuestiones asociadas a presas de escollera con pantalla de hormigón. En la primera, exponen sus reflexiones sobre las condiciones de diseño en la presa de Kárahnjúkar, de 198 m de altura sobre cimientos y ya con 5 años de explotación, incluyendo aspectos como los diques de cola, la fisuración de las losas de hormigón o los asentamientos del cuerpo de presa. Por su parte, en la respuesta R16 Johannesson comparte sus recomendaciones para mejorar el comportamiento de las presas de escollera con pantalla de hormigón a largo plazo.

3.4. Mejora de la seguridad estática, hidrológica y sísmica, incluyendo la posible puesta fuera de servicio

En este último subtema de la cuestión Q.95 puede encontrarse, además de 3 artículos relacionados con la rehabilitación de presas, 1 respuesta sobre sistemas de auscultación y 8 comunicaciones sobre el comportamiento de presas en escenarios sísmicos y su análisis.

Desde Irán, Sohrabi et al. muestran en la respuesta R3 un interesante ejemplo de cómo influye en los cálculos dinámicos de una presa bóveda el introducir como sollicitación sísmica múltiples deformaciones impuestas en el cimiento, no una única para todo el contacto. Utilizan como caso de estudio la presa de Pacoima.

Anil K. Chopra, de EEUU, en su respuesta R30 refleja sus investigaciones sobre los modelos dinámicos utilizados para evaluar y mejorar la seguridad de presas bóveda construidas. Identifica los factores determinantes en el análisis tridimensional, como la modelación del efecto del embalse, el dominio del cimiento, la interacción presa-agua, la absorción de energía en el contorno del embalse, la compresibilidad del agua, la interacción presa-cimiento y las variaciones espaciales de la sollicitación sísmica.

Mellal et al., desde Suiza, muestran en la respuesta R41 el comportamiento dinámico de una presa arco-gravedad construida a principios de los años 30 y que presenta una fisura evolutiva aparecida tras 20 años de explotación. La fisura está perfectamente auscultada y la presa no plantea problemas de seguridad en escenario ordinario de explotación. Sus estudios han analizado de forma conservadora el comportamiento de la presa en escenario sísmico, determinando que no precisa refuerzo alguno.

Los otros cinco artículos dedicados a la seguridad sísmica, del R36 al R40, provienen de autores japoneses, empezando por Tsuchida et al., que analizan los criterios necesarios para evaluar la seguridad de azudes en una región donde existe un riesgo de licuefacción extremo en los materiales donde apoyan.

Akira y Mitsuzumi presentan en la respuesta R37 el comportamiento a largo plazo y el análisis del comportamiento dinámico en la presa de Kurobe.

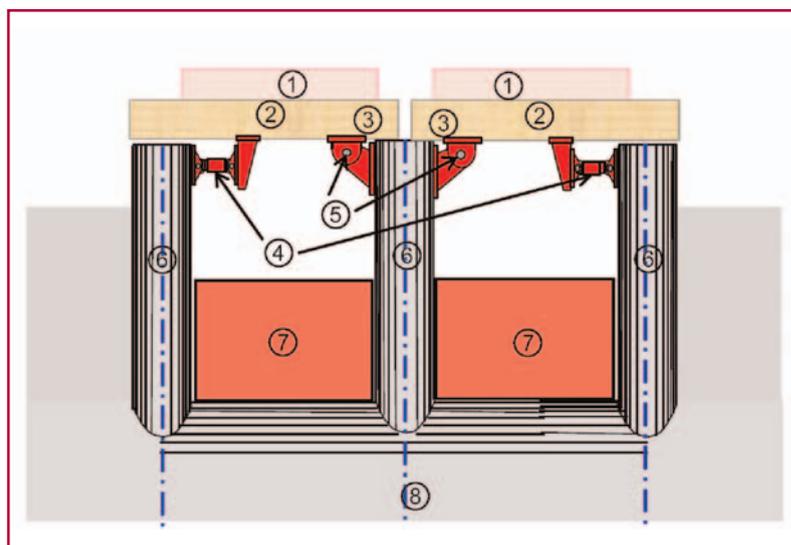


Fig. 4. Propuesta de refuerzo estructural del aliviadero para la presa de Sasamagawa. Analizado por Kumazaki y Sawai en la R38. Cabestrante; (2) Puente; (3) Punto fijo; (4) Amortiguador; (5) Bulón; (6) Pila del aliviadero; (7) Compuerta de aliviadero; (8) Cuerpo de presa.

Esta estructura es una presa bóveda construida en 1963, con una altura sobre cimientos de 186 m, una longitud de coronación igual a 492 m y un volumen aproximado de 1.600.000 m³. A lo largo de 40 años de explotación se ha recopilado datos de auscultación en escenarios estáticos y sísmicos (incluyendo grandes terremotos), desde el primer llenado, por lo que la información aportada por los autores constituye una referencia de enorme interés.

En la respuesta R38, Kumazaki y Sawai muestran un interesante caso de mejora de seguridad de un aliviadero en escenarios sísmicos, con el objetivo de mantener la funcionalidad de las compuertas. En concreto, ejemplifican con la presa de Sasamagawa, de gravedad y planta recta, que cuenta en su aliviadero de superficie con dos compuertas radiales de 11,8 m de altura y 9,0 m de ancho.

En la respuesta R39, Soda et al. muestran la respuesta dinámica de la presa de Aratozawa, de escollera con núcleo arcilloso y 74,4 m de altura, bajo condiciones sísmicas severas. De hecho, aprovechando los registros reales disponibles en los sismógrafos de la cerrada, evalúan las propiedades tenso-deformacionales de los materiales de la presa.

Terminando con los artículos dedicados a la seguridad sísmica, Hayashida et al. comparten en la respuesta R40 su investigación numérica relativa al comportamiento dinámico de diversas tipologías de presas de materiales sueltos. Los autores realizan un análisis retrospectivo para numerosos embalses de



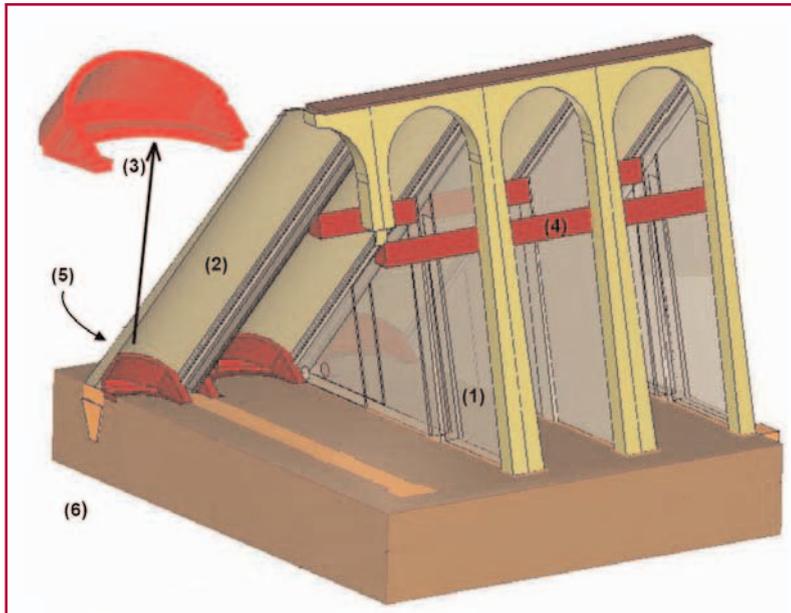


Fig. 5. Proyecto de refuerzo de la presa de Pannecière. Analizado por Carrere et al. en la R20. Contrafuerte (semi-transparente); (2) Inyección de fisuras en arcos; (3) Refuerzo a base de hormigón armado; (4) Vigas de refuerzo entre contrafuerte; (5) Geomembrana impermeable aguas arriba; (6) Pantallas de impermeabilización y drenaje.

riego construidos en Japón antes de los años 60. Muchas de estas presas se construyeron con unas directrices que, hoy en día, se encuentran fuera del estado del arte. De hecho, la investigación está motivada por el colapso, debido a fenómenos de licuefacción, de varias de estas viejas estructuras durante episodios sísmicos.

Respecto a los artículos relacionados con la rehabilitación de presas, Carrere et al. desde Francia muestran los detalles asociados al refuerzo de la presa de Panneciere, una estructura de múltiples arcos aquejada de varias patologías.

Johnson et al., desde Suráfrica, detallan en la respuesta R34 todos los aspectos tenidos en cuenta en la futura rehabilitación de la presa de Hammarsdale, que requiere medidas urgentes. Entre ellas, una detallada prospección geotécnica, una revisión de la hidrología y una evaluación de la calidad de las aguas.

Finalmente, Konow y Helle, autores noruegos de la respuesta R35, presentan la rehabilitación de la presa de Vierkvev con anclajes pretensados. Se trata de una presa diseñada inicialmente de gravedad pero, debido a la escasez de material cementicio durante la Segunda Guerra Mundial, tuvo que rediseñarse como de mampostería dotada de una losa de hormigón aguas arriba.

4. Ponencias españolas

De manera especial, se incluye a continuación un resumen detallado de las 5 respuestas españolas presentadas en esta cuestión Q.95.

4.1. R23: seguridad de una presa bóveda y deformaciones a largo plazo

Este artículo, elaborado por Francisco J. Sánchez Caro, revisa el proceso del análisis y la observación de deformaciones de una presa (en este caso bóveda, aunque se trata de un proceso general, aplicable a cualquier tipología de presa) estableciendo procedimientos, criterios y limitaciones, con objeto de detectar y prevenir un potencial comportamiento problemático, básicamente en la fase de explotación de la presa. Desde este punto de vista, este trabajo asigna la gran importancia al análisis de la evolución de deformaciones de carácter no elástico, como una herramienta clave para valorar la seguridad de la presa.

El principio teórico en el que se basa el criterio de seguridad es la relación existente entre el factor de seguridad y la velocidad de deformación anelástica. Es bien conocido que todos los materiales modifican sus propiedades con el tiempo. Estas modificaciones son evidentes en los efectos que tienen cargas sobre ellos. Entre ellos, quizá el fenómeno más conocido sea el de fluencia (creep), asociado a lentas deformaciones que tienen lugar bajo tensión constante.

Las etapas típicas de fluencia son:

- Fluencia primaria o inicial, donde la velocidad de deformación es relativamente alta, pero disminuye a medida que pasa el tiempo.
- Fluencia secundaria o de estado estacionario, donde la velocidad de deformación con el tiempo llega a un mínimo y se convierte casi en constante.
- Fluencia terciaria, donde la velocidad de deformación aumenta exponencialmente con el tiempo hasta la eventual rotura. Esta etapa no siempre ocurre y, dependiendo del material y el nivel de estrés, nunca se puede llegar (por lo tanto, nunca se alcanzaría el fallo, al menos en una escala temporal razonable).

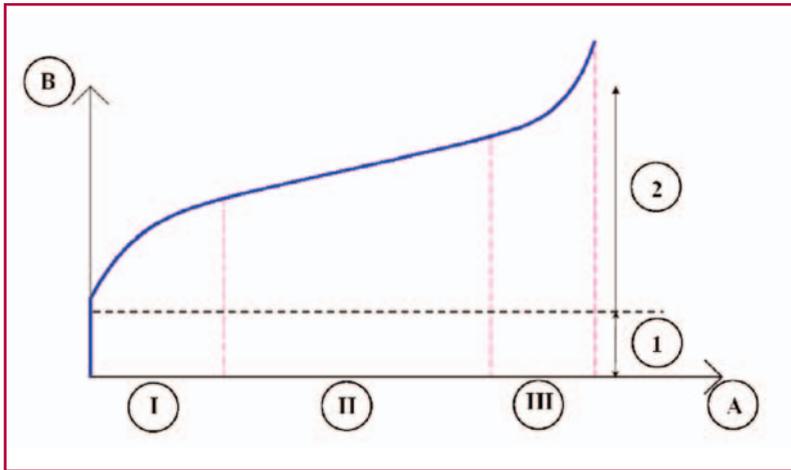


Fig. 6. Fases de la deformación en el proceso de fluencia, analizado por Sánchez Caro en la R23. Escala temporal (años); (B) Deformaciones; (1) Deformación elástica; (2) Deformación inelástica; (I) Fase inicial de fluencia; (II) Fase secundaria de fluencia; (III) Fase terciaria de fluencia.

La fatiga es un proceso similar a la fluencia pero en el que intervienen una tensión o acción cíclica de amplitud constante alternante (carga y/o temperatura). Respecto a las deformaciones estructurales fatiga, se puede decir que éstas son comparables a las que produciría una cierta "fluencia equivalente o efectiva". Se supone, entonces, que existe una "equivalencia o asimilación" entre estos procesos de "fluencia y la fatiga" en un proceso más general que se podría llamar "fluencia global".

Este enfoque permite la realización de un doble análisis (cualitativo y cuantitativo), tal como se detalla en el artículo. El análisis cuantitativo tiene, además, la indudable ventaja de su absoluta objetividad (reproducible por cualquier técnico).

El objetivo del artículo es obtener conclusiones prácticas basadas exclusivamente sobre el análisis e investigación de casos reales; para ello, se ha elegido la Presa de El Atazar (canal de Isabel II).

La sencilla aplicación del procedimiento de análisis de errores de los movimientos radiales medidos en los péndulos, con respecto a los modelizados, permiten evaluar la velocidad de deformación anelástica, en cada punto de la presa, con una precisión excelente.

Es la primera vez que se detecta con claridad la existencia de velocidades significativas de las deformaciones plásticas en el ámbito de la cimentación de la margen izquierda de esta presa. Las preguntas a realizarse son evidentes:

- ¿Es este un proceso reciente?

- ¿Tiene este proceso tiene algo que ver con el incidente de 1978?

Lógicamente, es posible aplicar este procedimiento no sólo al momento actual, sino "con carácter retroactivo" en toda la historia de los movimientos radiales de la presa, desde el inicio de su explotación. El análisis de esta información dio como resultado algunas consecuencias claras:

- La grieta aparece y se desarrolla en gran medida durante el primer llenado, antes de 1973 (otra cosa es que el incidente no se producirá hasta 1978, cuando la grieta intersecta con la galería).
- El grado de precisión en la medida de las velocidades de deformación anelásticas puede ser descrito como excelente. Así, se confirma que el proceso de fluencia del cimiento en su margen izquierda es único y está, aún hoy, en plena actividad.
- La presa de El Atazar seguirá siendo suficientemente segura mientras se verifique que el ritmo de sus deformaciones plásticas siga siendo decreciente.

4.2. R24: construcción de grandes presas en las islas Canarias

En la respuesta R24, Jaime González lleva a cabo un emocionante y emocionado repaso a la historia de la construcción de grandes presas en las Islas Canarias. De hecho, entre los años 1900 y 1980 se materializaron más de 100 grandes presas en las Islas, siendo destacable la bóveda de Soria, con 132 m de altura.

Entre las viejas presas canarias, se puede encontrar en primer lugar estructuras de mampostería con mortero de cal, como es el caso de la presa de Pinto, donde la impermeabilidad en el paramento de aguas arriba se lograba mediante una capa de mortero de cal y cemento. La mayor parte de estas presas tienen planta curva y una sección triangular con paramento de aguas arriba vertical, y muchas carecen de aliviadero, sistema de drenaje o galerías de inspección.

A pesar de los métodos constructivos y el diseño escogido, muchas de estas primeras presas canarias se beneficiaron por apoyar en cimientos constituidos por basaltos, traquitas y otras formaciones de gran capacidad de soporte. Otra ventaja que favoreció

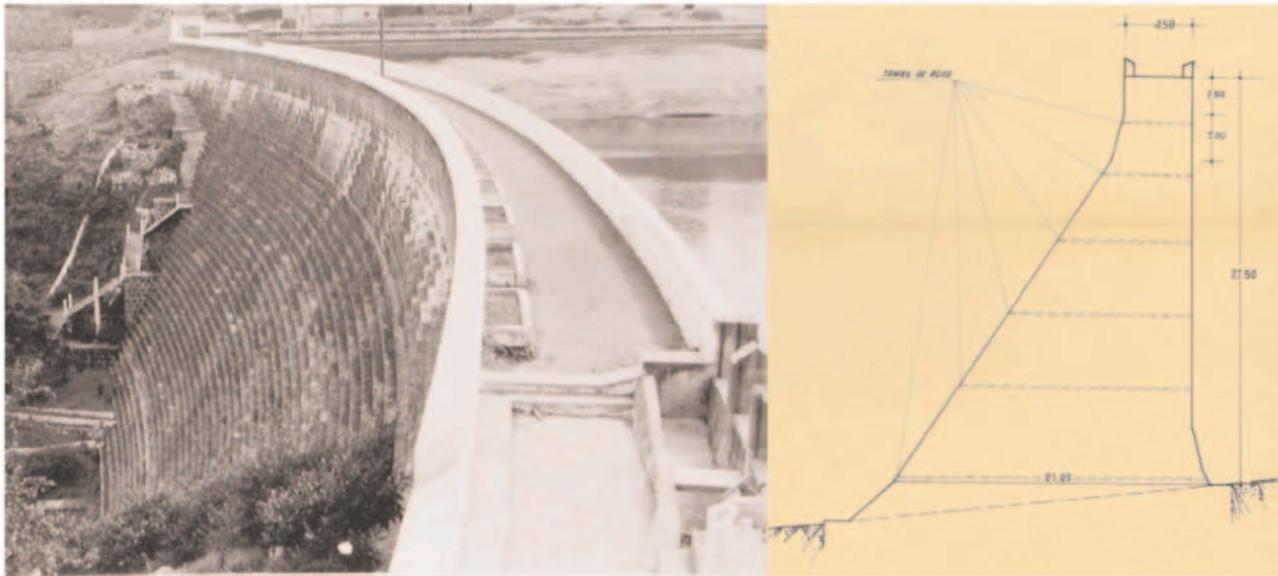


Fig. 7. Vista y sección tipo de la presa de Pinto, incluida por González en la R24.

la estabilidad de estas estructuras es que, por la limitación de medios, se construyeron a un ritmo lento y ello permitió el endurecimiento de los morteros. Finalmente, la capa impermeabilizante de aguas arriba, a base de mortero de cal y cemento, se mostró muy adecuada para su función. En cualquier caso, el autor también relata varios ejemplos de roturas catastróficas, que sirvieron como lecciones para el futuro.

En una segunda fase, se puede encontrar otro numeroso grupo de presas de mampostería donde el mortero utilizado en el cuerpo de presa incluye, además de la cal, cemento. De esta manera, entre 1902 y 1961, se construyeron en las Islas Canarias un total de 41 grandes presas en mampostería, fundamentalmente para asegurar el regadío a los plataneros, además del abastecimiento a Las Palmas y el Puerto de la Luz.

El autor menciona cómo el ingeniero Fernando Sáenz Ridruejo indicaba que, a raíz de las notas técnicas emitidas por Manuel Alonso Franco en 1964, una mayor racionalidad se impuso en el diseño y construcción de las presas canarias. En aquellas fechas, Seguridad de Presas indicó que el Estado debería hacerse cargo de materializar la seguridad de las viejas presas de mampostería mediante la suficiente auscultación y refuerzo.

El autor continúa repasando las vicisitudes y anécdotas de varias presas más modernas, entre ellas, la presa bóveda de Soria, que terminó de construirse en 1972, la presa de Siberio, que sufrió un

incidente en su plinto durante el primer llenado, o las presas de La Encantadora, Ariñez, Amalahuigue, Mulagua y Tirajana.

Finalmente, el artículo concluye destacando el importante patrimonio histórico e hidráulico que suponen las presas canarias, haciendo un llamamiento a la necesidad de conocer el nivel real de seguridad que presentan las presas más antiguas.

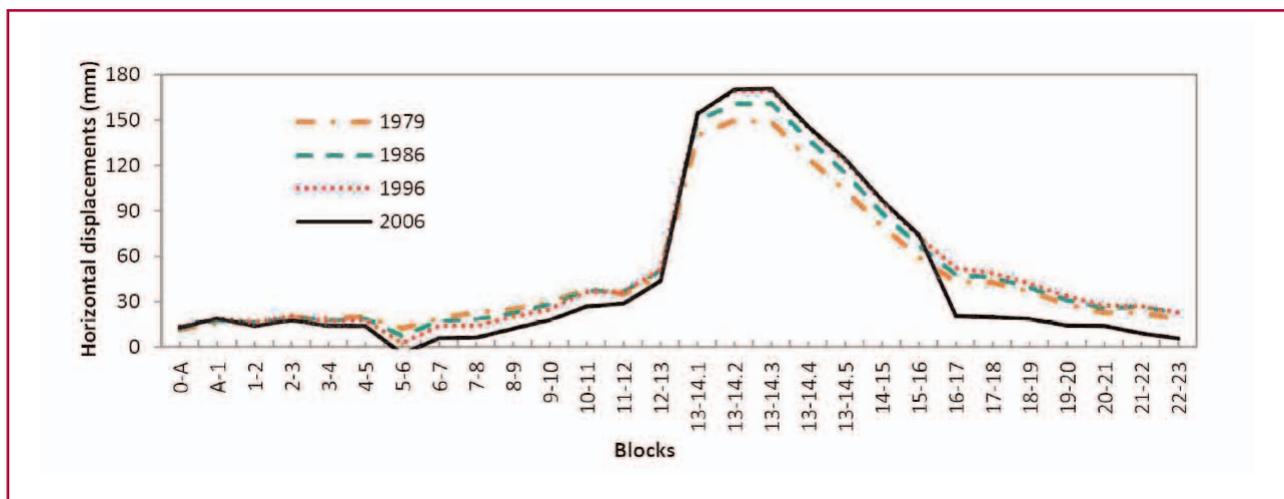
4.3. R25: análisis numérico de la presa de Mequinenza

En la respuesta R25, J.M. Buil, F. Río, A. Campos, C. López y A. Aguado llevan a cabo una detallada exposición de los últimos modelos numéricos elaborados para analizar el comportamiento de la presa de Mequinenza, incluyendo en los mismos el patrón de fisuras que la presa presenta.

La presa de Mequinenza forma parte de la explotación hidroeléctrica de un tramo del río Ebro, actualmente explotada por ENDESA y, en su día, por ENHER. Se trata de una presa de gravedad, con planta recta, que tiene una altura máxima de 79 m y una longitud de coronación igual a 461 m. Cuenta con un bloque de grandes dimensiones, de 70 m de ancho, donde se sitúan las tuberías forzadas de la central (entre las juntas 13 y 14).

El primer llenado del embalse se culminó en diciembre de 1965, y entre los años 1968 y 1971 varias campañas de inyección se llevaron a cabo, esencialmente sobre el bloque 13-14, con el objetivo de sellar unas fisuras horizontales y comprobar el alcance de una filtración

Fig. 8. Desplazamientos horizontales registrados en la coronación de Mequinenza, incluida por Buil, Río, Campos, López y Aguado en la R24.



que surgía aguas abajo. Posteriormente, entre 1972 y 1974, se completó una pantalla de drenaje desde la coronación de la presa hacia las galerías inferiores.

Ya durante el primer llenado de la presa pudo observarse con claridad la aparición de desplazamientos horizontales hacia aguas abajo, más evidentes en ese bloque 13-14, y con cierto seguimiento en los adyacentes. A partir de los registros históricos, puede apreciarse que la mayor parte de esas deformaciones acació antes del año 1979, aunque no puede afirmarse que el proceso haya concluido en la actualidad.

En un primer momento, el titular de la presa llevó a cabo una serie de estudios experimentales y numéricos con el objetivo de determinar las causas de los desplazamientos anormales que la presa mostraba. La hipótesis que se adoptó para explicar las excesivas deformaciones del bloque 13-14 frente al resto, se basaba en una expansión del hormigón inducida por el efecto del agua del embalse, descartando reacciones químicas de cualquier tipo. En cualquier caso, esta hipótesis no lograba representar fidedignamente las diferencias de desplazamiento entre el bloque 13-14 y el resto.

Más recientemente, el titular de la presa ha llevado a cabo nuevos estudios sobre la cuestión, reformulando la hipótesis que explicaría el fenómeno existente en la presa de Mequinenza, donde el bloque 13-14 muestra un comportamiento claramente diferenciado del resto. La nueva hipótesis incluye dos efectos acoplados; uno que tiene lugar de forma global en todos los bloques de la presa, y otro específico del bloque 13-14, que se refleja ligeramente en los adyacentes al mismo.

El fenómeno que afecta a todos los bloques, efectivamente, se trataría de una expansión del hormigón in-

ducida por el agua del embalse, dando lugar a unas deformaciones más reducidas que las del bloque 13-14, y uniformes. Por su parte, el fenómeno localizado en el bloque 13-14 estaría causado por la apertura de fisuras aparecidas en el paramento de aguas arriba, a favor de antiguas juntas de construcción, durante los primeros años de explotación de la presa. Las singulares características de este bloque 13-14 habrían facilitado el debilitamiento de esas juntas de construcción, debido a efectos térmicos y de retracción.

De esta manera, los autores continúan su comunicación explicando las características y detalles del modelo numérico bidimensional confeccionado para representar el comportamiento de la presa en el bloque 13-14. En concreto, se trata de un modelo de elementos finitos que permite modelar las discontinuidades del hormigón y el fenómeno de la fisuración, mediante elementos de espesor nulo. El modelo constitutivo se basa en la teoría de la elastoplasticidad e incorpora conceptos de la mecánica de fractura.

En primer lugar, los autores emplean un modelo elástico lineal, con un módulo de elasticidad igual a 20 GPa para el hormigón y 45 GPa en el cemento, junto con un coeficiente de Poisson de 0,2. Para representar adecuadamente el fenómeno generalizado de la expansión, adoptan un espesor de 6,1 m de hormigón, desde el paramento de aguas arriba, imponiendo en esa banda unas deformaciones de 0,35 mm/m en el hormigón. Todo ello se traduce en coronación como un desplazamiento horizontal de 5,96 cm y vertical de 2,18 cm. Posteriormente, emplean un modelo no lineal en los elementos que representan las zonas fisuradas en la realidad (en las juntas constructivas) e incluyen el efecto de



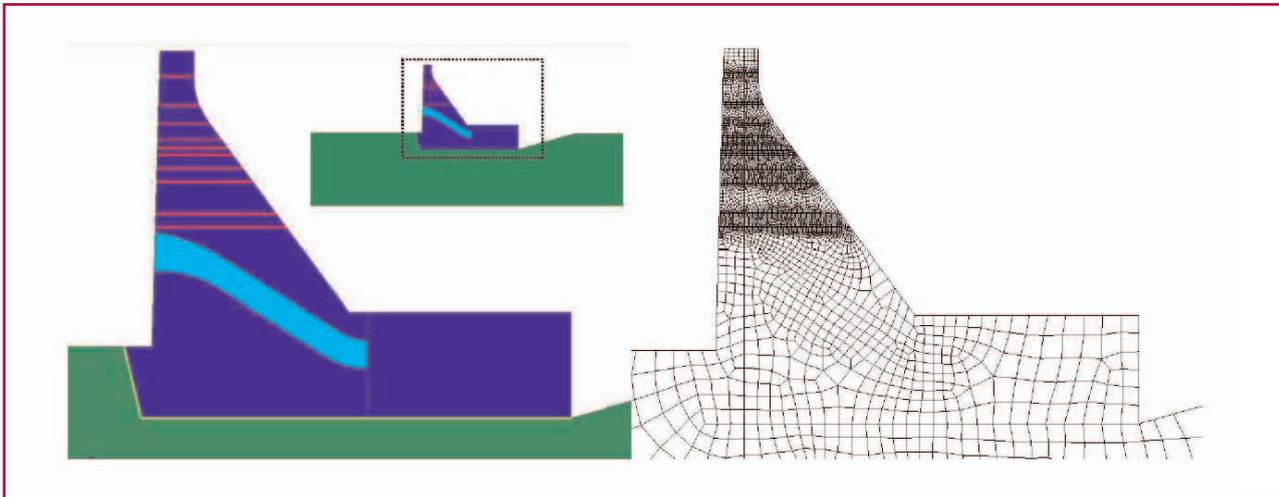


Fig. 9. Geometría y detalle de la malla de elementos finitos utilizada para representar el bloque 13-14 de la presa de Mequinenza; incluida por Buil, Río, Campos, López y Aguado en la R24.

la subpresión en las fisuras horizontales para, de esta manera, simular el fenómeno particular del bloque 13-14.

Imponiendo valores de expansión debida al agua del embalse entre 0,35 y 0,45 mm/m, junto con la modelización de la fisuración en las juntas constructivas, los autores obtienen con el modelo resultados que siguen muy fielmente la realidad. En añadidura, incluyen a posteriori un modelo simplificado de infiltración, basado en la ecuación de Richards, para simular la evolución de los desplazamientos a lo largo del tiempo (pues las deformaciones aumentan conforme el agua penetra en las fisuras). Los resultados obtenidos con la simulación combinada del agua penetrando desde el paramento de aguas arriba, más el modelo mecánico que incluye las juntas horizontales de construcción, permiten confirmar satisfactoriamente la nueva hipótesis formulada por los autores. También revelan la importancia de los trabajos de drenaje llevado a cabo en la presa hace 40 años, que permitieron suavizar y estabilizar las deformaciones de la presa.

4.4. R26: una propuesta para optimizar el mantenimiento de los sistemas de vigilancia y auscultación en presas

En la respuesta R26, A. Gil, L.A. Arguedas y M. G. Membrillera presentan una propuesta para optimizar el mantenimiento de los sistemas de auscultación en presas. La vigilancia y auscultación constituyen una herramienta esencial en la gestión de seguridad de presas y, a su vez, el correcto funcionamiento de un sistema de auscultación requiere un mantenimiento continuo de todos sus elementos; incluyéndose la ins-

trumentación junto con los sistemas de automatización y comunicación.

Especialmente en presas, donde se realiza un control a largo plazo, es importante garantizar el funcionamiento permanente durante varias décadas. Los titulares muchas veces no disponen de los recursos humanos o económicos suficientes para hacer frente a las necesidades de mantenimiento. Se requiere un elevado grado de compromiso para realizar las tareas encamina-



Fig. 10. Caída de agua a través de un péndulo directo, incluida por Gil, Arguedas y G. Membrillera, en la R26.

das a mantener en un estado adecuado los sistemas de auscultación; incluyendo personal cualificado y con experiencia, así como los medios materiales necesarios.

Los sistemas de auscultación existentes en las presas, constan de multitud de elementos, mecánicos, electrónicos, manuales o automáticos. La mayoría de ellos, instalados en el interior de la presa, se ven sujetos a exposiciones prolongadas al principal causante de todos los daños, el agua. Esta se manifiesta en forma de filtraciones, condensaciones o incluso inundaciones. En el caso de los elementos exteriores hay que añadir además las inclemencias del tiempo y la naturaleza.

Por otra parte, los sistemas de auscultación instalados en las presas son muy variados y difieren de forma notable de unos modelos a otros según el fabricante de la instrumentación, empresa instaladora, ingeniería contratada e incluso de los requisitos particulares del cliente. En cualquier caso, lo que verdaderamente importa, es el principio de funcionamiento de cada uno de los sensores que se encuentren instalados. Así mismo, cuando se habla de mantenimiento hay que diferenciar entre equipamiento manual y automático. Como regla de oro, no hay que olvidar la importancia de mantener en buen estado la instrumentación manual, dado que será la que se utilice como referencia para detectar fallos de funcionamiento o desajustes en el sistema automático.

Los autores continúan con una descripción de los principales tipos de controles que conforman los sistemas de auscultación en las presas, detallando los puntos de supervisión más destacados con el fin de, mediante una optimización de los recursos de mantenimiento disponibles, obtener un funcionamiento adecuado que satisfaga las necesidades de obtención de datos que, posteriormente, se procesan para ser convertidos en información útil sobre el nivel de seguridad de la presa.

Una vez repasados los elementos que conforman los diferentes sistemas de control, los autores describen los principales problemas que pueden afectar al funcionamiento de los sensores de auscultación y las tareas de medición, al tiempo que aportan las soluciones más adecuadas según la problemática. En concreto, analizan los principales inconvenientes encontrados en la práctica:

- Problemas causados por el agua: filtraciones y salpicaduras
- Problemas de condensación en equipos



Fig. 11. Ejemplo de problemas de condensación en equipos de medida, incluida por Gil, Arguedas y G. Membrillera, en la R26.

- Falta de limpieza en sensores y útiles de medición
- Deficiencias de iluminación

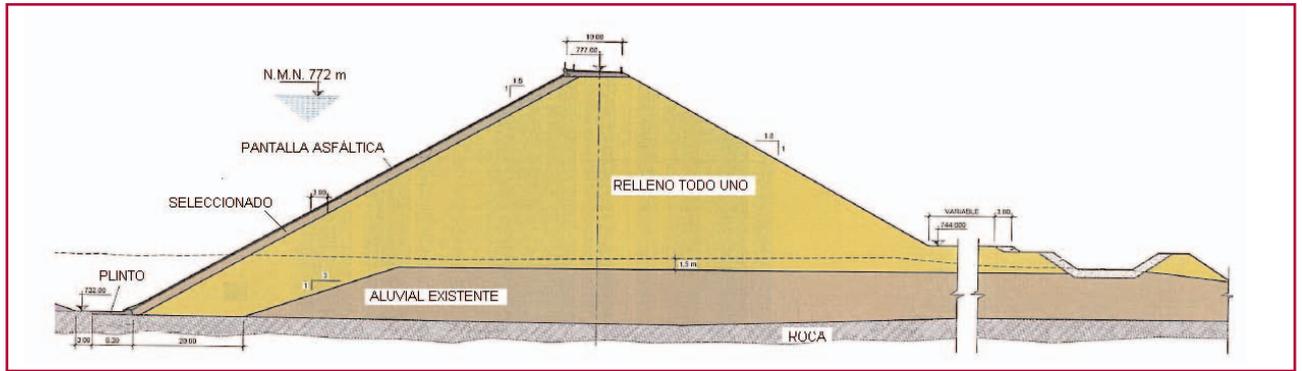
Comprendidos los problemas que puede ocasionar en el análisis de una estructura el disponer de datos de auscultación que sean erróneos o imprecisos, o simplemente no disponer de ellos, resulta evidente la necesidad de mantener en un estado de funcionamiento adecuado todos los elementos que componen estos sistemas.

Los autores indican que el proceso completo de mantenimiento comprende, en primer lugar, un análisis visual previo, en el que se puede orientar de forma aproximada la dirección que deberán tomar las tareas a realizar sobre el sistema de auscultación. Seguidamente, tras un análisis completo de funcionalidad (verificación, toma de medidas, calibración, y limpieza), se evalúa detenidamente cualquier posible foco que esté generando algún tipo de deterioro sobre el sistema. Es entonces cuando se plantea la posibilidad de establecer posibles soluciones que eliminen o minimicen el impacto que pueda tener dicho foco sobre el funcionamiento global del sistema. Finalmente, solo queda la implantación de dichas soluciones.



Fig. 12. Proceso de mantenimiento de sistemas de auscultación en presas, incluida por Gil, Arguedas y G. Membrillera, en la R26.

Fig. 13. Sección tipo de la presa de Terroba, incluida por Lafuente et al. en la R27.



4.5. R27: diseño de una pantalla de inyecciones con el fin de minimizar las filtraciones a largo plazo.

Presa de Terroba

La última de las respuestas presentadas por autores españoles es la R27, elaborada por R. Lafuente, I. Domingo, C. Gutiérrez, F. Royo, N. Nájera, J. Molina y B. Domínguez, que relatan el proceso de diseño seguido para definir una pantalla de inyecciones duradera que minimice el riesgo de filtraciones a largo plazo en la presa de Terroba.

La presa de Terroba está siendo construida por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el Norte de España, concretamente en el valle del río Leza en la región de La Rioja. Esta presa se sitúa en un valle en U, con elevada amplitud que hace que la zona inferior de apoyo de la presa sea sensiblemente horizontal. La tipología de presa es de materiales sueltos con pantalla asfáltica y planta recta, con una altura máxima de 40 m sobre cimiento. El cuerpo de presa es de material todo uno (caliza, marga y acarreo), siendo los taludes de la

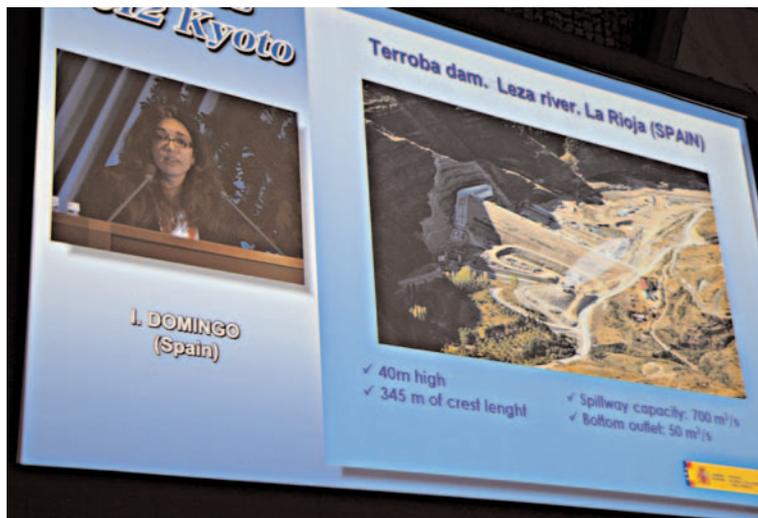
presa adoptados para ambos paramentos de 1,8H:1,0V.

Por su parte, la cimentación del cuerpo de presa se hace directamente sobre el aluvial y la cimentación del plinto se hace sobre roca, siendo necesario excavar el aluvial del cauce. El sustrato rocoso en laderas y fondo de valle está constituido por calizas, limolitas calcáreas, y lutitas-argilitas, pertenecientes al Cretácico Inferior, y que se presentan en facies Purbeck.

Al inicio de las obras, los autores identificaron los principales riesgos a largo plazo de la cimentación de la presa, en concreto:

- Falta de impermeabilidad en el entorno del plinto, pues el contacto de la pantalla asfáltica con el plinto, y los primeros metros de potencia del sustrato rocoso bajo el plinto, presentan un elevado riesgo de fugas de agua si no se consigue su total sellado y estanqueidad.
- Durabilidad de la pantalla de impermeabilización, pues la mayor parte del plinto quedará sumergido en embalse muerto, debido a la cota del desagüe de fondo.

Fig. 14. Presentación de la ponencia en el congreso.



Más adelante, se llevó a cabo una campaña de campo para disminuir las incertidumbres planteadas, consistente en la realización de sondeos adicionales a los de proyecto, la ejecución de ensayos Lugeon en toda la traza del plinto hasta grandes profundidades, y una serie de taladros de prueba e inyección en la pantalla de consolidación.

La campaña se complementó con estudios de gabinete, donde se completó la definición de la planta geológica de la cerrada, la evaluación de las discontinuidades del macizo rocoso y, finalmente, una validación del apoyo del plinto, para asegurar material con grado II según ISMR.

En paralelo con las anteriores tareas, se ha estudiado y realizado pruebas de laboratorio y campo para poder definir las lechadas óptimas y sus parámetros asociados, tanto de características como de puesta en obra. El procedimiento de inyección se ha ajustado al método GIN (Número de Inyección de Lechada) definido por G. Lombardi. De hecho, se ha conjugado la curva GIN, las presiones máximas de inyección, el tipo de cemento, la cohesión de la lechada, los aditivos más convenientes, las relaciones agua/cemento y la inclinación de los taladros.

Posteriormente, los autores reflejan cómo se ha redactado en obra un detallado y amplio protocolo de trabajo para la consolidación e impermeabilización, recogiendo, a modo de resumen, los siguientes aspectos relevantes:

- Separación entre taladros
- Profundidad de los taladros
- Presiones de inyección y límites de la curva GIN
- Densidad de anclajes
- Longitud de módulos de plinto
- Aditivos
- Relación agua/cemento
- Otros aspectos constructivos, como las geometrías para permitir una transición suave entre el apoyo rígido que supone el plinto sobre roca y el apoyo flexible del cuerpo de presa, o el estudio pormenorizado de todos aquellos puntos de debilidad frente al paso del agua en obras de hormigón o contactos hormigón-roca.

Los autores destacan cómo mediante un adecuado estudio de las condiciones del macizo rocoso, las posibilidades de las lechadas y las geometrías posibles de plinto se ha podido conseguir una fórmula de trabajo que optimiza la relación coste/calidad y coste/objetivos que se perseguía. Tras un proceso de estudios y pruebas, en la presa de Terroba se ha materializado una pantalla de impermeabilización con un sellado completo gracias a una relación optimizada de la lechada de inyección, con una presión de inyección que ha rellenado el máxi-



Fig. 15. Construcción del plinto en la presa de Terroba, incluida por Lafuente et al. en la R27.

mo de fisuras posibles de la roca, con un radio aceptable de influencia y penetrando en las fisuras de menor apertura.

5. Conclusiones

En el presente artículo se ha analizado las respuestas a la Cuestión 95 (Envejecimiento y mejora) del pasado XXIV Congreso Internacional de Grandes Presas, organizado por el ICOLD en Kyoto.

Teniendo en cuenta la edad media del inventario mundial de presas, que crece inexorablemente, junto con la limitación de recursos existente, resulta primordial extender la vida útil de las presas alcanzando los niveles de seguridad que la sociedad demanda.

La inversión en el conocimiento del estado real de las infraestructuras y su mantenimiento se torna esencial, por un lado, para mantener el valor patrimonial de estas infraestructuras y, por otro, para garantizar que el servicio que prestan se desarrolla en condiciones adecuadas de seguridad, funcionalidad y eficacia.

Estas conclusiones generales pueden trasladarse directamente al contexto español, donde se están produciendo intensos ajustes presupuestarios y, precisamente, resulta más evidente la responsabilidad por invertir en el mantenimiento y conservación a fin de evitar onerosos costes futuros a la sociedad. ♦

Referencias:

- (1) Several Authors. "Question 95. Ageing and upgrading". *Transactions XXIV International Congress on Large Dams*, pp. 1 to 669. Kyoto, ICOLD, Paris 2012

Q95. Ageing and upgrading

This paper summarizes and comments on the main oral and written contributions submitted to "Question 95. Ageing and upgrading", which took place during the XXIV International Congress on Large Dams, held in Kyoto during June 2012.

As the worldwide inventory of dams ages, and quite a few structures have been in operation for over 100 years, ICOLD has eagerly fostered research and development on this subject.

Question 95, on Ageing and Upgrading dams, received forty one responses from 18 countries on the following topics:

1. Risks associated with long-term behavior of dam foundations
2. Long-term behavior of concrete and masonry dam materials and structures
3. Long-term behavior of embankment and CFRD dam materials and structures
4. Upgrading for static, flood and seismic safety, including considering decommissioning

Under the first theme, on risks associated to long-term behavior, a range of interesting foundation issues were identified. The discussions at the Congress were focused on identifying the risk issues that should be considered in effective risk informed dam safety and operations management.

Under the second theme, a range of issues on the long term management of concrete and masonry dams were addressed. Particular attention is paid to cases of chemical expansion of concrete.

Under the third theme, issues in the monitoring of embankment dams, canals and dikes were discussed as well as two papers on current issues with CFRD.

Finally, under the fourth theme, in addition to papers on general rehabilitation, there were several papers on seismic behavior of concrete and embankment dams, including recent developments in analysis procedures.

Concerning Spanish papers, 5 responses were submitted to Q95.

Response 23 examines the process of analyzing and monitoring arch dam deformations, establishing procedures, criteria and limitations, in order to detect and prevent unwanted behavior. The aim of this paper is to reach practical conclusions based on real events (El Atazar dam).

In Response 24, construction of large dams in the Canary Island is tackled. In fact, over 100 hundred large dams were constructed there between 1900 and 1980. Most of these dams were built using cyclopean masonry, but a few rockfill dams and a single arch dam were also constructed. The historical and cultural value of these great structures must be acknowledged, and their safety condition must be urgently inspected.

Response 25 addresses numerical analysis of Mequinenza dam and discusses the issue of water-induced concrete expansion in relation to the magnitude of the displacements measured. Thanks to the results obtained, it was possible to adequately simulate the process of formation and propagation of horizontal cracks in block 13-14, which to a great degree are responsible for the much more pronounced displacements in this block, compared with the rest of the blocks in the dam.

Dam surveillance aims to detect, by visual observation and monitoring, any phenomenon that can compromise the structural and operating integrity of a structure or its related operating equipment. It plays a crucial role in the realm of dam safety management. In addition to visual inspections, the goal of monitoring systems is to measure certain physical parameters of dams so as to follow their evolution. In Response 26, the authors, based on their experience, offer practical solutions and provide maintenance guidelines to enhance the general state of these systems.

Lastly, Response 27 addresses designing a durable grout curtain in order to minimize long-term seepage at Terroba dam. This is an earthfill embankment dam with an asphaltic concrete facing and grout curtain. Following a process of studies and tests, the design of the grout curtain has resulted in a watertight seal thanks to an optimized slurry with an injection pressure that has sealed the maximum possible joints in the rock, being also able to fill the smallest cracks.

Concluding remarks to Q95 point out the importance of investing in extending the operational life of our dams as far as possible, optimizing operation and maintenance, assessing their safety levels, and keeping them in a safe and effective condition.

These conclusions are fully applicable to the Spanish context, where severe austerity measures have been pushed through, and the responsibility of investing in monitoring and maintenance so as to avoid future social expenditure turns out to be self-evident. ♦

